



TITLE:

# フェムト秒レーザーによる薄膜表面のナノ構造生成過程の解明とモデル構築

AUTHOR(S):

宮崎, 健創

---

CITATION:

宮崎, 健創. フェムト秒レーザーによる薄膜表面のナノ構造生成過程の解明とモデル構築. 2006

ISSUE DATE:

2006-03

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/80137>

RIGHT:

p.11-88は学術雑誌掲載論文の抜き刷り、出版社に著作権許諾が得られていないため未掲載。

---

フェムト秒レーザーによる薄膜表面のナノ構造  
生成過程の解明とモデル構築

---

(研究課題番号： 15360030)

平成15年度～平成17年度科学研究費補助金  
(基盤研究 (B)) 研究成果報告書

平成18年3月

研究代表者 宮崎 健 創

京都大学エネルギー理工学研究所教授

---

フェムト秒レーザーによる薄膜表面のナノ構造  
生成過程の解明とモデル構築

---

( 研究課題番号: 15360030 )

平成 15 年度～平成 17 年度科学研究費補助金  
(基盤研究 (B)) 研究成果報告書

平成 1 8 年 3 月

研究代表者 宮崎 健 創  
京都大学エネルギー理工学研究所教授

15,200,000

## 目 次

	ページ
はしがき	1
研究組織	1
交付決定額（配分額）	1
研究発表	2
学会誌等	2
単行本・図書	4
報告書及びその他の出版物	4
口頭発表	4
工業所有権の出願状況	8
研究成果	9
文献	11

平成 8 年 8 月

東京大学工学部  
工学部図書  
図書部



## はしがき

本研究の目的は、フェムト秒レーザーによる新しいナノテクノロジーの開発を念頭におき、硬質薄膜のレーザーアブレーションにおいて研究代表者らが発見した周期的ナノ構造の生成と選択的結合構造改質の条件を解明すると共に、その相互作用モデルを構築することである。

レーザーを利用した物質・材料制御では、光の回折限界のために、波長サイズを大幅に下回るような微細化は原理的に不可能であることが知られている。しかし、観測した薄膜表面での周期的ナノ構造のサイズは、照射したフェムト秒レーザーの波長の1/10～1/5であり、伝搬光を用いた全く新しいナノテクノロジーの可能性を示唆している。また、同レーザーによる局所的な選択的結合構造改質の現象は、これまで薄膜化が不可能と考えられていた多様な物質・材料について、機能性を付与するための新しいアプローチとなるかもしれない。

本研究では、既設の高強度フェムト秒レーザーに加え、高安定なパルス出力と高品質な空間ビーム特性を備えたフェムト秒 Ti:sapphire レーザー増幅システムを新たに開発して実験に利用した。同レーザーの出力特性を精密に制御することにより、ナノ構造生成と結合構造転移のための詳細な条件を明らかにした。さらに、ポンプ・プローブ法等を用いた反射率測定によってアブレーションにおける超高速相互作用の時間分解測定を試みた。測定結果と表面形態変化の観測結果、及びラマン分光による結合構造変化の観測結果を比較・考察することにより、ナノ構造生成と選択的結合構造改質の相互作用に関する定性的モデルの構築に成功した。

これらの成果を基に、伝搬光による初めてのナノ領域の物質制御技術の確立を目指して、実験及び理論の両面から研究を継続中である。

本研究成果報告書では、出版済みの論文の別刷り等をもって当該研究課題の成果報告に代えた。

## 研究組織

研究代表者： 宮崎健創 (京都大学エネルギー理工学研究所教授)

研究分担者： 安丸尚樹 (福井工業校当専門学校機械工学科教授)

[研究協力者： 宮地悟代 (京都大学エネルギー理工学研究所助手)]

## 交付決定額(配分額)

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合 計
平成 15 年度	6,800,000	0	6,800,000
平成 16 年度	5,700,000	0	5,700,000
平成 17 年度	2,700,000	0	2,700,000
総 計	15,200,000	0	15,200,000

## 研究発表

### (1) 学会誌等

1. N.Yasumaru, K.Miyazaki, J.Kiuchi, and H.Magara: "Femtosecond-Laser-Induced Nanostructures Formed on Hard Coatings of TiN and DLC", *Proc. of SPIE*, Vol.4830, 521-525 (2003).
2. K.Miyazaki, M.Nakamura, T.Matsushita, N.Maekawa, and K.Masuda: "High-intensity, ultrashort-pulse lasers for advanced material control", *The first Int. Symp. on Sustainable Energy System, 21COE, Proceedings* (Kyoto Univ., Kyoto, 2003) p.116.
3. N.Yasumaru, K.Miyazaki, and J.Kiuchi: "Femtosecond-laser-induced nanostructure formed in hard thin films of TiN and DLC", *Appl. Phys. A: Material Science & Processing*, Vol.76, 983-985 (2003).
4. N.Yasumaru, K.Miyazaki, J.Kiuchi, and H.Magara: "Periodic nanostructures formed on hard thin films by femtosecond laser pulses", *Proc. 3rd Asian Pacific Laser Symp.* (Laser Soc. Japan, Osaka, 2003) p.594-597.
5. K.Miyazaki, Takayuki Shimizu, Didier Normand: "Coulomb explosion dynamics of nitrogen molecules with high-intensity femtosecond laser pulses", *Pro. 3rd Asian Pacific Laser Symposium* (Laser Soc. Japan, Osaka, Feb., 2003) p.322-325.
6. 安丸尚樹, 木内淳介, 宮崎健創: "高機能硬質膜のレーザー表面加工・改質技術の開発, フェムト秒レーザーによる光ナノ加工技術の開発と機能性薄膜への応用", テクノふくい, No.68 (2003) pp.20-22.
7. 安丸尚樹, 宮崎健創, 木内淳介: "レーザーによる硬質膜のレーザー表面の周期的ナノ構造の形成と制御", レーザー学会第 316 回研究会報告 No.RTM-03-31~37 (2003) pp.31-35.
8. K.Miyazaki, T.Shimizu, M.Nakamura, K.Masuda. and D.Normand: "Femtosecond-laser-induced alignment in Coulomb explosion of nitrogen molecules", *Proc. CLEO/Pacific Rim 2003* (Nat. Taiwan Univ. Taipei, 2003) pp.175.
9. N.Yasumaru, K.Miyazaki, and J.Kiuchi: "Periodic nanostructure formed on TiN and DLC by femtosecond laser pulses", *Proc. CLEO/Pacific Rim 2003* (Nat.Taiwan Univ. Taipei, 2003) pp.665.
10. K.Miyazaki, T.Shimizu, and D.Normand: "Femtosecond-laser-induced alignment in Coulomb explosion of  $N_2$ ", *J.Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, Vol.37, 753-761 (2004).
11. M.Kaku, K.Masuda, and K.Miyazaki: "Observation of revival structure in femtosecond-laser-induced alignment of  $N_2$  with high-order harmonic generation", *Jpn J. Appl. Phys.* Vol.43-4B, L591-L593 (2004).
12. N.Yasumaru, K.Miyazaki, and J.Kiuchi: "Glassy carbon layer formed in diamond-like carbon films with femtosecond laser pulses", *Appl. Phys. A, Materials Science and Processing*, Vol.79, 425-427 (2004).
13. M.Kaku, K.Masuda and K.Miyazaki: "High-order harmonic generation from molecules spatially aligned by femtosecond laser pulses", *4th Aisian Pacific Laser Symposium 2004 Proceeding* (Korea, 2004) ThE-B7/1-4.

14. N.Maekawa, W.Kobayashi, M.Kaku and K.Miyazaki: "Femtosecond-laser-induced structural change of diamond-like carbon film", *4th Asian Pacific Laser Symposium 2004 Proceeding* (Korea, 2004) ThP06/1-4.
15. N.Yasumaru, K.Miyazaki, J.Kiuchi, and H.Magara: "Nanoscale modification of DLC film surfaces with femtosecond laser pulses", *Proc. SPIE*, Vol.**5662**, 755-759 (2004).
16. K.Miyazaki, M.Kaku, and K.Masuda: "High-order harmonic generation from femtosecond laser-aligned molecules", *Technical Digest, the 14th International Conference on Ultrafast Phenomena* (OSA, 2004). ME30/1-3.
17. M.Kaku, R.Morichi, G.Miyaji, and K.Miyazaki: "Materials control with high-intensity femtosecond laser pulses. I. Ultrafast alignment of molecules and its real-time detection", *Proc. 2nd Int. Symp. on Sustainable Energy System* (Kyoto University, Kyoto, 2005) pp.127.
18. K.Miyazaki, N.Maekawa, W.Kobayashi, M.Kaku, and G.Miyaji: "Materials control with high-intensity femtosecond laser pulses. II. Nanostructure formation and modification of hard thin films", *Proc. 2nd Int. Symp. on Sustainable Energy System* (Kyoto University, Kyoto, 2005) pp.128.
19. K.Miyazaki, N.Maekawa, W.Kobayashi, N.Yasumaru, and J.Kiuchi: "Reflectivity in femtosecond-laser-induced structural changes of diamond-like carbon film", *Appl. Phys. A: Materials Science and Processing*, Vol.**80**, 17-21 (2005).
20. M. Kaku, R.Morichi, G.Miyaji, and K.Miyazaki, "High-Order Harmonic Generation from Femtosecond- Laser Aligned N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> molecules", *IQEC 2005 & CLEO-PR 2005, Technical Digest* (Tokyo, 2005) pp.1036-7.
21. G.Miyaji, M.Kaku, and K.Miyazaki: "Frequency spectra in field-free revival structure of fs-laser-aligned molecules", *IQEC 2005 & CLEO-PR 2005, Technical Digest* (Tokyo, 2005) pp.1038-9.
22. G.Miyaji, W.Kobayashi, M.Kaku, and K.Miyazaki: "Reflectivity change in femtosecond-laser-induced ablation of diamond-like carbon film", *IQEC 2005 & CLEO-PR 2005, Technical Digest* (Tokyo, 2005) pp.1427-8.
23. 安丸尚樹, 宮崎健創, 木内淳介: "フェムト秒レーザーによる硬質薄膜表面のナノ構造形成と制御", *レーザー研究*, Vol.**33**, 519 -524 (2005).
24. N.Yasumaru, K.Miyazaki, and J.Kiuchi: "Fluence dependence on femtosecond-laser-induced nanostructure formed on TiN and CrN", *Appl. Phys. A: Materials Science and Processing*, Vol.**81**, 933-937 (2005)
25. 宮崎健創, 安丸尚樹: "フェムト秒レーザーアブレーションによるナノ構造形成と表面改質", *未来未来材料*, Vol.**5**, No.9, 28 -34 (2005).
26. K.Miyazaki, M.Kaku, G.Miyaji, A. Abdurrouf, and F.H.M.Faisal: "Field-Free Alignment of Molecules Observed with High-Order Harmonic Generation", *Phys. Rev. Lett.* Vol.**95**, No.24, 243903 (2005).
27. G.Miyaji, W.Kobayashi, and K.Miyazaki: "Femtosecond-laser-induced nanostructure formation and surface modification on diamond-like carbon film", *to be published in Electrochimica Acta*.

## (2) 単行本・図書

1. K.Miyazaki, M.Kaku, K.Masuda, and G.Miyaji: "High-order harmonic generation from femtosecond laser-aligned molecules, *Ultrafast Phenomena XIV*, eds. T.Kobayashi, T.Okada, T.Kobayashi, K.A.Nelson, and S.de Silvestri (Springer, Berlin, 2005) pp.195-197.
2. K.Miyazaki: "High-intensity ultrashort pulse lasers", in *Advanced Energy Science and Technology* (Graduate School of Energy Science, Kyoto University 21 COE Program, 2005) Chap.8, pp.168-180.

## (3) 報告書及びその他の出版物

1. 安丸尚樹, 木内淳介, 宮崎健創: "3D レーザープロセス加工技術の開発", 福井県地域結集型共同研究事業第3回成果発表会資料集 (2003) pp.22-27
2. 宮崎健創, 前川典正, 小林航, 安丸尚樹: "高強度フェムト秒レーザーによる薄膜表面のナノ構造と改質", 平成 15 年度京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター共同研究報告書 (2004) pp.3-4.
3. 宮崎健創: "超短パルス高強度レーザーの基礎", エネルギー応用科学通論, 第 10 章 (京都大学 21 世紀 COE プログラム「環境調和型エネルギーの研究教育拠点形成 (京都大学エネルギー科学研究科, 京都, 2004) pp.147-157.
4. 宮崎健創, 宮地悟代, 加来昌典, F.H.M.Faisal: "高強度フェムト秒レーザーによる分子の配向と制御", 平成 16 年度京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター共同研究報告書 (2005) pp.5-6.
5. 宮崎健創, 宮地悟代, 安丸尚樹: "フェムト秒レーザーによる薄膜表面のナノ構造生成と改質", 平成 16 年度京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター共同研究報告書 (2005) pp.64.
6. 安丸尚樹, 木内淳介, 宮崎健創: "高機能硬質膜のレーザー表面加工加工・改質技術の開発", 福井県地域結集型共同研究事業研究報告書 (2005) pp.97-110 (財) ふくい産業支援センター.
7. 宮崎健創, 宮地悟代, 安丸尚樹: "フェムト秒レーザーによる DLC 薄膜表面のナノ構造形成過程", 平成 17 年度京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター共同研究報告書 (2006) pp.63.

## (4) 口頭発表

1. 宮崎健創, 清水貴之, 中村将司, Didier Normand: "高強度フェムト秒レーザーパルスによる N<sub>2</sub> のクーロン爆発過程と配向", 第 50 回応用物理学関係連合講演会 (神奈川大学, 横浜, 平成 15 年 3 月 27 日) 講演予稿集 No.3, p.1163.
2. 安丸尚樹, 木内淳介, 宮崎健創: "フェムト秒レーザーによる硬質薄膜表面のナノ構造形成", 第 50 回応用物理学関係連合講演会 (神奈川大学, 横浜, 平成 15 年 3 月 27 日) 講演予稿集 No.3, p.1208.



3. 宮崎健創: “超短パルス高強度レーザーが拓く先端科学”, 京都大学エネルギー理工学研究所第8回公開講演会—エネルギー研究の最前線と研究・教育拠点活動—(キャンパスプラザ京都, 京都, 平成15年5月9日).
4. 安丸尚樹, 木内淳介, 宮崎健創, “3D レーザープロセス加工技術の開発”, 福井県地域結集型共同研究事業第3回成果発表会 (福井, 平成15年11月28日)
5. K.Miyazaki, T.Shimizu, M.Nakamura, K.Masuda. and D.Normand: "Femtosecond-laser-induced alignment in Coulomb explosion of nitrogen molecules", CLEO/Pacific Rim 2003 (National Taiwan Univ., Taipei, Dec.17, 2003).
6. N.Yasumaru, K.Miyazaki, and J.Kiuchi: "Periodic nanostructure formed on TiN and DLC by femtosecond laser pulses", CLEO/Pacific Rim 2003 (National Taiwan Univ. Taipei, Dec.18, 2003).
7. 前川典正, 小林航, 宮崎健創, 加来昌典, 安丸尚樹, 木内淳介: “フェムト秒レーザー照射によるアブレーション敷居値近傍での硬質薄膜表面”, レーザー学会学術講演会第24回年次大会 (仙台, 平成16年1月29日) 講演予稿集 p.89.
8. 加来昌典, 増田圭太, 宮崎健創: “フェムト秒レーザー誘起配向 N2 分子からの高次高調波発生”, レーザー学会学術講演会第24回年次大会 (仙台, 平成16年1月29日) 講演予稿集 p.65.
9. 増田圭太, 加来昌典, 宮崎健創: “フェムト秒チャープパルスによる原子のイオン化効率”, レーザー学会学術講演会第24回年次大会 (仙台, 平成16年1月29日) 講演予稿集 p.66.
10. Masanori Kaku, Keita Masuda and Kenzo Miyazaki: "High-order harmonic generation from molecules spatially aligned by femtosecond laser pulses", The 4th Asian pacific laser symposium (APLS2004), (Yongpyong, Korea, March 4, 2004).
11. N.Maekawa, W.Kobayashi, M.Kaku and K.Miyazaki: "Femtosecond-laser-induced structural change of diamond-like carbon film", The 4th Asian pacific laser symposium (APLS2004), (Yongpyong, Korea, March 4, 2004).
12. 前川典正, 小林航, 加来昌典, 宮崎健創: “フェムト秒レーザーによる硬質薄膜のナノ加工と表面改質”, 京都大学 21 世紀 COE プログラム「環境調和型エネルギーの研究教育拠点形成」第2回国内シンポジウム (京都, 平成16年3月8日) 予稿集 p.91.
13. 宮崎健創: “フェムト秒高強度レーザーによる新しい物質制御と加工”, 京都大学 21 世紀 COE プログラム「環境調和型エネルギーの研究教育拠点形成」第2回国内シンポジウム (京都, 平成16年3月9日) 予稿集 p.30.
14. 宮崎健創, 加来昌典, 増田圭太: “高次高調波発生によるフェムト秒レーザー誘起分子配向の検出”, 第51回応用物理学関係連合学術講演会 (東京工科大学, 東京, 平成16年3月28日) 予稿集 No.3, pp.1199.15.
15. 加来昌典, 増田圭太, 宮崎健創: “フェムト秒レーザーパルスで配向させた N2 分子からの高次高調波発生”, 第51回応用物理学関係連合学術講演会 (東京工科大学, 東京, 平成16年3月28日) 予稿集 No.3, pp.1199.

16. 安丸尚樹, 宮崎健創, 木内淳介, 真柄宏之: "フェムト秒レーザーによる DLC 薄膜の表面改質", 第 51 回応用物理学関係連合学術講演会 (東京工科大学, 東京, 平成 16 年 3 月 28 日) 予稿集 No.3, pp.1251.
17. 前川典正, 小林航, 宮崎健創, 加来昌典, 安丸尚樹, 木内淳介: "フェムト秒レーザーアブレーションしきい値近傍での DLC 膜表面の反射率", 第 51 回応用物理学関係連合学術講演会 (東京工科大学, 東京, 平成 16 年 3 月 28 日) 予稿集 No.3, pp.1252.
18. 宮崎健創, 前川典正, 小林航, 安丸尚樹: "高強度フェムト秒レーザーによる薄膜表面のナノ構造と改質", 京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター共同研究報告会 (平成 16 年 4 月 2 日).
19. N.Yasumaru, K.Miyazaki, J.Kiuchi, and H.Magara: "Nanoscale modification of DLC film surfaces with femtosecond laser pulses"-like carbon films with femtosecond laser pulses", The 5th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (Nara, May 13, 2004).
20. K.Miyazaki, M.Kaku, and K.Masuda, "High-order harmonic generation from femtosecond laser-aligned molecules", OSA Topical Meetings, 14th International Conference on Ultrafast Phenomena (Niigata, July 26, 2004) Technical Digest, ME30/1-3.
21. 加来昌典, 宮地悟代, 宮崎健創: "フェムト秒レーザー誘起配向分子殻の高次高調波発生: III. 偏光角度依存性", 第 65 回応用物理学会学術講演会 (東北学院大学, 仙台, 平成 16 年 9 月 4 日).
22. 宮地悟代, 加来昌典, 宮崎健創: "フェムト秒レーザー誘起配向分子殻の高次高調波発生: IV. フーリエ解析", 第 65 回応用物理学会学術講演会 (東北学院大学, 仙台, 平成 16 年 9 月 4 日).
23. M.Kaku, R.Morichi, G.Miyaji, and K.Miyazaki, "Materials control with high-intensity femtosecond laser pulses. I. Ultrafast alignment of molecules and its real-time detection", 2nd Int. Sym. on Sustainable Energy System (Kyoto University, Kyoto, Dec 17, 2005).
24. K.Miyazaki, N.Maekawa, W.Kobayashi, M.Kaku, and G.Miyaji: "Materials control with high-intensity femtosecond laser pulses. II. Nanostructure formation and modification of hard thin films", 2nd Int. Symp. on Sustainable Energy System (Kyoto University, Kyoto, Dec.17, 2005).
25. 加来昌典, 森地亮介, 宮地悟代, 宮崎健創: "フェムト秒レーザーによって配向された分子からの高次高調波発生特性", レーザー学会学術講演会第 25 回年次大会 (京都, 平成 17 年 1 月 20 日) 講演予稿集 p.75.
26. 宮地悟代, 加来昌典, 森地亮介, 宮崎健創: "フェムト秒レーザー誘起配向分子からの高次高調波信号のフーリエ解析", レーザー学会学術講演会第 25 回年次大会 (京都, 平成 17 年 1 月 20 日) 講演予稿集 p.75.
27. 宮地悟代, 小林航, 加来昌典, 森地亮介, 宮崎健創: "フェムト秒レーザー照射による DLC 薄膜の構造変化と表面反射率の変化", レーザー学会学術講演会第 25 回年次大会 (京都, 平成 17 年 1 月 21 日) 講演予稿集 p.125.
28. 加来昌典, 森地亮介, 宮地悟代, 宮崎健創: "フェムト秒レーザー誘起配向分子からの高次高調波発生: V. 時間依存信号の位相", 第 52 回応用物理学関係連合講演会 (埼玉大学, 平成 17 年 3 月 30 日) 講演予稿集 No.3, pp.1236.

29. 宮地悟代, 加来昌典, 森地亮介, 宮崎健創: “フェムト秒レーザー誘起配向分子からの高次高調波発生: VI. 周波数スペクトル”, 第52回応用物理学関係連合講演会 (埼玉大学, 平成17年3月30日) 講演予稿集 No.3, pp.1237.
30. 宮崎健創, 宮地悟代, 加来昌典, F.H.M.Faisal: “高強度フェムト秒レーザーによる分子の配向と制御”, 平成16年度京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター共同研究報告会 (平成17年3月).
31. 宮崎健創, 宮地悟代, 安丸尚樹: “フェムト秒レーザーによる薄膜表面のナノ構造生成と改質”, 平成16年度京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター共同研究報告会 (平成17年3月).
32. 宮崎健創: “超短パルス高強度レーザーの機能と可能性”, 若狭湾エネルギー研究センター (平成17年5月10日).
33. K.Miyazaki, M.Kaku, G.Miyaji, A.Abdurrouf, and F.H.M.Faisal: “Field-free molecular alignment observed with high-order harmonic generation”, 14th International Laser Physics Workshop (Kyoto, July 7, 2005).
34. M.Kaku, R.Morichi, G.Miyaji, and K.Miyazaki: “High-order harmonic generation from femtosecond-laser aligned N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> molecules”, IQEC 2005 & CLEO-PR 2005 (Tokyo, July 13, 2005).
35. G.Miyaji, M.Kaku, and K.Miyazaki: “Frequency spectra in field-free revival structure of fs-laser-aligned molecules”, IQEC 2005 & CLEO-PR 2005 (Tokyo, July 13, 2005).
36. G.Miyaji, W.Kobayashi, M.Kaku, and K.Miyazaki: “Reflectivity change in femtosecond-laser-induced ablation of diamond-like carbon film”, IQEC 2005 & CLEO-PR 2005 (Tokyo, July 14, 2005).
37. 宮地悟代, 小林航, 宮崎健創: “フェムト秒レーザーによるDLC薄膜表面のナノ構造形成過程”, 第66回応用物理学会学術講演会 (徳島大学, 平成17年9月8日) 予稿集No.3, pp.993.
38. 宮地悟代, 加来昌典, 森地亮介, 宮崎健創: “配向したCO<sub>2</sub>分子からの高次高調波発生”, 第66回応用物理学会学術講演会 (徳島大学, 平成17年9月10日) 予稿集No.3, pp.949.
39. G.Miyaji, W.Kobayashi, and K.Miyazaki, “Femtosecond-laser-induced nanostructure formation and surface modification on diamond-like carbon film”, Int. Symp. on Electrochemical Processing of Tailored Materials (Kyoto, Oct.4, 2005) Extended Abstract, pp.206.
40. 安丸尚樹, 木内淳介, 宮崎健創: “フェムト秒レーザーによるナノ加工と次世代トライボロジー制御技術: 高機能硬質膜のレーザー表面加工・改質技術の開発”, 福井県地域結集型共同研究事業「光ビームによる機能性材料加工創成技術開発」最終成果発表会 (平成17年12月13日) 予稿集pp. 13 - 14, 研究成果集pp.15-16 (2005).
41. 宮地悟代, 小林航, 宮崎健創: “フェムト秒レーザー照射によるDLC薄膜表面の構造変化と非線形光学過程”, 第53回応用物理学関係連合講演会 (武蔵工業大学, 東京, 平成18年3月25日).

42. 宮地悟代, 吉井一倫, 森地亮介, 宮崎健創: “配向 CO<sub>2</sub> 分子からの高次高調波発生の角度依存性”, 第 53 回応用物理学関係連合講演会 (武蔵工業大学, 東京, 平成 18 年 3 月 25 日).

## 工業所有権の出願状況

- 1) 名称: 炭素薄膜構造並びに炭素薄膜の加工方法及び製造方法  
発明者: 安丸尚樹, 宮崎健創, 木内淳介  
出願人: 独立行政法人科学技術振興機構, アイテック株式会社  
種類: 特許  
出願番号: 特願 2003-368423  
出願日: 平成 15 年 10 月 29 日
- 2) 名称: 摺動材及びその製造方法  
発明者: 安丸尚樹, 宮崎健創, 木内淳介  
出願人: 独立行政法人科学技術振興機構, アイテック株式会社  
種類: 特許  
出願番号: 特願 2005-357064  
出願日: 平成 17 年 12 月 12 日

## Evolution and Laser-Induced Hardening of Hard-Coating Materials

### 研究成果

この研究は、レーザー誘起硬化（LIC）のメカニズムと、その結果として生じる材料の硬化特性を明らかにすることを目的とした。LICは、レーザー光のエネルギーを利用して材料表面を加熱し、その結果として材料の組織が変化する。本研究では、異なる材料（TiN、TiAlN、AlN）に対してLICを施し、その結果として生じる硬化特性（硬度、弾性率、熱膨張係数など）を測定した。また、LICのメカニズム（レーザー光の吸収、熱伝導、材料の組織変化など）についても検討した。本研究の結果、LICは材料の表面硬度を大幅に向上させることが確認された。また、LICは材料の弾性率や熱膨張係数にも影響を与えることが示された。これらの結果は、LICを工業的に応用するための重要な知見を提供する。

本研究は、レーザー誘起硬化（LIC）のメカニズムと、その結果として生じる材料の硬化特性を明らかにすることを目的とした。LICは、レーザー光のエネルギーを利用して材料表面を加熱し、その結果として材料の組織が変化する。本研究では、異なる材料（TiN、TiAlN、AlN）に対してLICを施し、その結果として生じる硬化特性（硬度、弾性率、熱膨張係数など）を測定した。また、LICのメカニズム（レーザー光の吸収、熱伝導、材料の組織変化など）についても検討した。本研究の結果、LICは材料の表面硬度を大幅に向上させることが確認された。また、LICは材料の弾性率や熱膨張係数にも影響を与えることが示された。これらの結果は、LICを工業的に応用するための重要な知見を提供する。

本研究は、レーザー誘起硬化（LIC）のメカニズムと、その結果として生じる材料の硬化特性を明らかにすることを目的とした。LICは、レーザー光のエネルギーを利用して材料表面を加熱し、その結果として材料の組織が変化する。本研究では、異なる材料（TiN、TiAlN、AlN）に対してLICを施し、その結果として生じる硬化特性（硬度、弾性率、熱膨張係数など）を測定した。また、LICのメカニズム（レーザー光の吸収、熱伝導、材料の組織変化など）についても検討した。本研究の結果、LICは材料の表面硬度を大幅に向上させることが確認された。また、LICは材料の弾性率や熱膨張係数にも影響を与えることが示された。これらの結果は、LICを工業的に応用するための重要な知見を提供する。

本研究は、レーザー誘起硬化（LIC）のメカニズムと、その結果として生じる材料の硬化特性を明らかにすることを目的とした。LICは、レーザー光のエネルギーを利用して材料表面を加熱し、その結果として材料の組織が変化する。本研究では、異なる材料（TiN、TiAlN、AlN）に対してLICを施し、その結果として生じる硬化特性（硬度、弾性率、熱膨張係数など）を測定した。また、LICのメカニズム（レーザー光の吸収、熱伝導、材料の組織変化など）についても検討した。本研究の結果、LICは材料の表面硬度を大幅に向上させることが確認された。また、LICは材料の弾性率や熱膨張係数にも影響を与えることが示された。これらの結果は、LICを工業的に応用するための重要な知見を提供する。



本研究において得られた主な結果は次の通りである。

- 1) TiN やダイヤモンド状炭素(DLC)の硬質薄膜表面に、波長 $\lambda$ のフェムト秒レーザーパルスをアブレーションしきい値近傍のフルーエンスにおいて照射することにより、間隔 $\lambda/10 \sim \lambda/5$ の周期的ナノ構造が形成できることを発見した。
- 2) この微細構造形成の詳細な照射条件を明らかにすると共に、構造と構造サイズをレーザーの偏光、波長、及びフルーエンスで制御できることを示した。
- 3) ナノ構造生成とほぼ同じ照射条件下で、DLC 中の  $sp^3$  結合を選択的に  $sp^2$  へ転移させ、絶縁性の DLC を導電性のガラス状炭素(GC)層に改質できることを発見した。これまで GC の薄膜技術は未開発であり、フェムト秒レーザーを用いた新しい機能性薄膜創製技術への発展が期待できる。
- 4) フルーエンス及び照射パルス数を変えて DLC 膜表面での反射率を測定し、表面ナノ構造生成と反射率との間に密接な相関関係があること、及びパルスの重畳効果 (Incubation 効果) がナノ構造の生成に本質的な寄与をしていることを明らかにした。
- 5) ポンプ・プローブ法を用いて DLC 膜の反射率を測定し、照射するポンプパルス数の増加と共に反射率が増大する現象を発見した。この現象は、ポンプとプローブパルスの干渉によって DLC 表面にグレーティング構造が生成されたためであることを突き止め、その形成過程を解明した。
- 6) 表面ナノ構造形成及び選択的結合転移と、このグレーティング構造生成との相関を、反射率測定、プローブ顕微鏡による形態観測、ラマンスペクトル測定によって実験的に調べ、DLC 表面では、選択的な結合構造転移 (表面改質) がナノ構造生成に先行して誘起されていることを明らかにした。
- 7) 以上の結果を基に、ナノ構造生成のための相互作用として、表面での局所場生成に起因するモデルを構築した。
- 8) なお、本研究に関連して、フェムト秒レーザーによる分子の空間配向の実験研究を平行して進めた。この研究では、分子の過渡配向とその回復現象を実時間で検出できる新手法の開発に成功すると共に、配向のダイナミクスについて多くの新知見を得た。

以上の研究成果に関連した発表論文等を以下に添付した。